

铜矿找矿工作中地球物理勘探技术运用研究

赵武奎

安徽省地质矿产勘查局312地质队, 安徽 蚌埠 233000

摘要: 随着全球工业化进程的不断加快, 各行业对铜资源的需求急剧攀升, 需提高铜矿找矿工作效率, 满足日益增长的资源勘探需求。为实现高效、精准的铜矿找矿目标, 本文首先深入剖析了铜矿资源的分布与特点, 其次分析了地球物理勘探技术在铜矿找矿中的显著应用优势, 最后聚焦于电法勘探技术, 提出了其在铜矿找矿中的应用策略。

关键词: 铜矿找矿; 地球物理勘探; 重力勘探; 磁法勘探; 电法勘探

中图分类号: P618.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-5065(2025)11-0055-3

Research on the Application of Geophysical Exploration Techniques in Copper Mine Exploration Work

ZHAO Wu-kui

Anhui Provincial Geological and Mineral Exploration Bureau 312 Geological Team, Bengbu 233000, China

Abstract: As the global industrialization process accelerates, the demand for copper resources in various industries has surged. To meet the growing demand for resource exploration, it is essential to enhance the efficiency of copper ore prospecting. This article first examines the distribution and characteristics of copper ore resources, then highlights the significant advantages of geophysical exploration technology in copper ore prospecting, and finally focuses on electrical exploration technology, proposing strategies for its application in copper ore prospecting.

Keywords: copper ore prospecting; Geophysical exploration; Gravity exploration; Magnetic exploration; electrical prospecting

现代工业体系中, 铜有良好的导电性、导热性以及抗腐蚀性, 广泛应用于电力、电子、建筑、交通等诸多领域, 是不可或缺的关键金属。随着全球经济的持续发展与工业化进程的推进, 各行业对铜资源的需求呈现出迅猛增长的态势, 而传统的铜矿勘探区域逐渐面临资源枯竭的困境, 寻找新的、更为丰富的铜矿资源已然成为保障工业可持续发展的当务之急, 而地球物理勘探技术能够在不破坏地质环境的前提下, 高效、精准地探测地下地质结构与矿体分布情况, 为铜矿找矿工作开辟了全新的路径。因此, 探讨如何在铜矿找矿中利用地球物理勘探技术具有较强的理论价值和现实意义。本文以电法勘探为例, 分析在实际铜矿找矿中的应用方法, 以达到提高找矿工作效率的目的。

1 铜矿资源的分布与特点

我国铜矿分布较为分散, 江西、云南、西藏等地均有铜矿分布, 江西矿床种类繁多, 包括斑岩型、矽卡岩型等; 云南的铜矿大多与沉积岩相关, 矿体形态相对复杂^[1]。

铜矿的特征主要反映在矿石类型与地质赋存状态上, 就矿石类型而言, 一般存在硫化铜矿和氧化铜矿, 具有较高的经济价值, 因其含铜量较高且利于选冶, 氧化铜矿包括赤铜

矿、孔雀石等, 该类矿石一般在矿床的浅部或氧化带形成, 其选冶难度相对较大^[2]。就地质赋存状态而言, 部分铜矿以脉状产出, 矿体受断裂构造控制, 沿断裂带分布; 部分呈层状或似层状, 与特定地层岩性有关, 另有部分铜矿以浸染状分布于岩石里, 需使用特定的探查技术识别。

2 地球物理勘探技术原理

2.1 重力勘探原理

地球表面的物体均受到引力和由自转引发的离心力的合力作用, 鉴于不同地质体的密度存在差异, 其对重力场造成的影响也不一样, 若存在密度较大的矿体, 如铜矿体时, 其会产生附加的引力, 引起局部重力值增大, 形成重力异常。重力勘探仪器通过精准测定不同地点的重力值, 再对这些数据进行梳理、分析, 进而得到能够切实体现地下地质体密度差异的重力异常数据。

2.2 磁法勘探原理

地球本身具有磁场, 而各类岩石及矿石中所含的磁性矿物, 如磁铁矿、磁黄铁矿等, 使得这些岩石和矿石在地球磁场中呈现出不同的磁性特征, 若存在磁性较强的地质体, 如与铜矿床相伴而生的磁性矿物集合体时, 会引起局部磁场的变化, 形成磁异常, 通过详析磁异常的特征, 如异常的梯度、幅值、走向等, 可推断地下磁性地质体的分布情况^[4]。

2.3 电法勘探原理

电法勘探基于不同地质体的电学性质差异, 主要包括电阻率、极化率等, 在给地下供电之际, 电流在地下介质中传播, 鉴于各类地质体电阻值不同, 电流的分布会发生变化, 对于电阻率较低的地质体而言, 如富含金属矿物的铜矿体,

收稿日期: 2025-04

作者简介: 赵武奎, 男, 生于1990年, 安徽蚌埠人, 本科, 工程师, 研究方向: 物探测量探矿。

电流更易通过, 一般出现低电阻异常^[5]; 对于电阻率较高的围岩, 电流较为不易通过, 表现为高电阻异常, 在地面布置供电电极和测量电极, 往地下通入直流电, 测量不同极距下的电位差, 由此计算得出地下介质的电阻率分布。

激发极化效应利用了金属矿物在电流施加的情形下可产生激发极化效应的属性。对地下空间进行放电操作的阶段, 金属矿物表面会带动一组电化学反应情形, 造就双电层结构。双电层在断电之际会开始缓慢放电, 随时间不断衰减的二次电势差, 利用测定这一激发极化电位的规模与衰减特质, 可甄别地下是否存在具备激发极化效应的地质体。

3 铜矿找矿中地球物理勘探的应用优势

3.1 提高勘探效率

传统的铜矿勘探方法往往要耗费大量的人力、物力和时间资源, 利用地质填图与浅井挖掘等方式来寻找铜矿, 进行大面积的实地勘查, 且仅能获取地表及浅部的信息, 地球物理勘探技术能在较短时间内对大面积区域进行勘查, 以航空地球物理勘探为例, 飞机搭载着各类地球物理勘探仪器, 按照既定的飞行路线进行飞行测量, 迅速获取大范围地区的重力、磁力等地球物理信息。一次航空地球物理勘查任务可覆盖几百乃至几千平方公里的区域, 与常规地面的探查方法相比, 极大缩短了勘探周期, 而且地球物理勘探技术可在不同的地形条件下开展工作, 不管是高山、丛林还是沙漠地带, 都能极为高效地进行数据采集^[3]。

3.2 精准定位矿体

地球物理勘探技术通过对地下物理场的精细测量和分析, 实现对铜矿体的精准定位, 不同的地球物理方法从多样视角对地下地质体进行探查, 重力勘探通过测量重力异常, 能够判定地下密度异常体的位置, 针对密度与围岩有明显差异的铜矿体, 可精准地圈定其大概范围。磁法勘探通过磁异常特征, 能够辨认与铜矿相关的磁性地质体的分布, 由此确定矿体的走向和边界, 电法勘探还可以通过测量电阻率、极化率等电性参数, 精准地确定铜矿体的位置与形态, 而且多种地球物理方法可相互验证与补充, 通过统筹分析重力、磁力和电法勘探的数据, 构建出地下地质体的三维模型, 能够更为精准地确定铜矿体在空间内的位置、大小和产状等特征, 跟传统勘探方法的盲目性相比, 地球物理勘探技术极大地提高了矿体定位的精准度^[4]。

4 铜矿找矿中电法勘探技术的应用策略

4.1 区域地质概况

某勘探区位于华北地台南缘褶皱带, 面积约25km², 区内出露地层以奥陶系灰岩为主, 局部发育石炭系砂页岩, 断裂构造以NE向压扭性断层为主, 次级断裂为矿液运移通道。已知钻孔揭示矿体主要赋存于断层破碎带与矽卡岩接触带, 矿体埋深50~300m, 矿化类型为矽卡岩型铜矿, 伴生黄铁矿、磁黄铁矿等硫化物。区域重力异常显示存在直径约

3km的重力高值区, 推测为隐伏岩体引起, 为铜矿成矿提供热源与物质基础。

4.2 基于高精度数据集反演的矿化带定位

矿区地形起伏突出特征(最大高差320m), 标准二维反演无视地形影响会引发矿化带定位偏差达到20%, 且隐伏矿体与围岩电阻率差异较小(矿体电阻率10~50Ω·m, 围岩200~500Ω·m), 需利用高精度反演提升分辨率。

数据采集采用温纳装置高密度电阻率方法, 电极距设定为5m, 沿测线方向部署12条测线, 测线长度2000m, 点距5m, 包围整个重力异常区。协同采集地形实测, 采样间隔2m, 形成1:2000地形等高线图。数据预处理步骤针对15%的坏点实施线性插值法置换, 采用最小二乘准则排除显著差异均值3倍标准差的异常值, 维持有效数据点8976个。反演依托Res2Dinv软件的带地形调整算手段, 初始模型配置为10层水平层状介质, 各层电阻率参照钻孔实测为0~50m: 500Ω·m, 50~150m: 300Ω·m, 150~300m: 150Ω·m。

激发极化法测量采用中间梯度装置, 供电电极距1000m, 测量电极距20m, 采集频率2Hz, 在3条控制剖面开展测量, 采集1200个极化率数据集, 极化率背景值为2%~3%, 矿化带极化率异常值升至8%-15%。反演迭代调整为20次, 当均方根误差降低到3.5%时结束运算。并制作二维电阻率断面图, 综合极化率异常分布, 将矿化带边界圈定在电阻率约50到100Ω·m电阻值、极化率5%-8%的区间内。

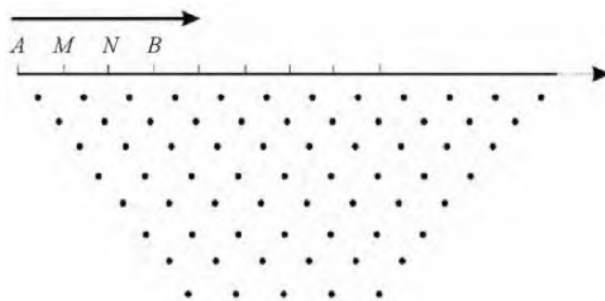


图1 维高密度电阻率法温纳布极方式

4.3 多参数电法联合探测的矿化信息提取

用矿区内非矿化的石墨化岩层及铜矿化带均表现为低阻特征, 单一电阻率参数不易辨别, 而矿化带中硫化物的激发极化效应明显, 使用多参数联合可提升矿化信息识别精度^[5]。

矿区中部铺设5条南北向测线, 线距500m, 点距50m, 并行开展CSAMT和TDIP测量。CSAMT选选取偶极-偶极装置, 供电频率配置为8Hz、16Hz、32Hz、64Hz、128Hz, 发射机输出电流恒定5A, 接收电极使用不极化电极, 采样间隔0.1s。TDIP测量用对称四极装置, 供电时间8s, 断电后1s、2s、4s、8s时刻采集电位差, 求采用充电率(M)和衰减时(τ), 每个测点重复测量3次, 选取平均值用

作有效数据集。

CSAMT 数据开展远区校准,收发距大于 300m 时,应用平面波近似处理,采用阻抗张量分解技术计算各向异性系数,当系数大于 0.2 时判定为矿化引起的异常,并对 TDIP 数据集执行标准化处理,推导不同时间的充电率比例 ($M4s/M1s$),当比大于 1.2 同时衰减时大于 0.5s 情况下,确定为矿化激电异常。处理综合 SIP 测量的 Cole-Cole 模型参数,若频率 1Hz 时的电阻率小于 $50\Omega \cdot m$ 电阻值、充电率大于 10%、时间常数大于 1s,则识别为高概率矿化区,本区域和已知钻孔矿化段的一致度为 85%。

4.4 复杂地质条件下干扰抑制及异常增强

矿区里存在着第四系的松散覆盖层(厚 0-15m)还有破碎带,电磁干扰信号强度会增至有效信号的 2-3 倍,掩盖掉深部矿化体的响应结果。所以要采用针对性手段提高信号跟噪声的比例。

针对 HDIP 测量,采用 60 道电极系统,电极按 200m 进行排列,滚动步长采用 50m,在破碎带发育区域将步距加密为 30m,采集数据时,采用 50Hz 陷波滤波来压制干扰,抵御工频干扰现象。

开展小波变换操作对原始数据去噪,选用 db4 作为所采用的小波基,实现五层的分解,针对第 4、5 层高频系数,并采用硬阈值方式处理,阈值设为 0.02V,数据重构后,信噪比实现了 40% 的增长。

开展对 MT 数据静态校正事宜,依靠相位张量法得出静态位移值。若校正量超出 50m,采用空间滤波技术做平滑性处理,实现视电阻率曲线连续程度提高 60%。

电磁耦合干扰极强地带,CSAMT 测量采用双频供电,频率为 50Hz 和 100Hz,依靠差分法消除耦合的信号,让相位测量误差处于 $\pm 2^\circ$ 以内的界限。采用 ICA 算法将多参数数据进行分离操作,输入的数据当中有电阻率、极化率与相位值,选用 3 个独立的分量组合。当某一分量与矿化标志层的相关系数达到 0.7 以上,判定此为矿化目标信号,矿化异常清晰度提高至 50% 增幅。

4.5 三维地电结构建模与矿化潜力预测

三维空间中矿体表现为透镜状分布情形,二维勘探难以呈现矿体的立体情况,而且矿化潜力受多方面因素作用,应凭借三维建模实现量化预测结果。

采取分布式电极阵列的方案,搭建八条测线,各条测线布置 100 个电极,搭建起边长各为 50m 的网格。采集三维电阻值数据,测量时采取滚动采集的形式,每次实施移动 20 个电极的动作,保障数据覆盖整个矿区全域。

采用有限元正演仿真,对模型网格做剖分处理,得到 $100 \times 100 \times 50$ 个单元,水平方向为 50m 乘以 50m,垂向延伸 20m,有关已知钻孔约束的矿体段(埋深为 120~180m,采用 $30 \sim 60\Omega \cdot m$ 电阻率进行约束,地表设置为自由面,底部以及侧面采取绝缘措施。

采用共轭梯度反演的算法,把迭代次数设成 30 次,若

均方根误差降至 2.5%,则停止计算操作,得到三维电阻率模型。低阻区 ($<50\Omega \cdot m$) 体积占比为 12%。

确立电阻率与品位的关系建模,依据 10 个钻孔采集的数据,如果电阻率在 $30 \sim 50\Omega \cdot m$ 范围,铜的品位可能介于 1.0% 至 2.5%;如果电阻率处于 $50 \sim 100\Omega \cdot m$,品位可能为 0.3% 到 1.0%。

依托磁法以及重力数据进行综合,采用模糊综合测评途径,给三维网格单元中的每一个赋予矿化概率值。若概率值超出 0.7,那么可以划定为一级靶区,后续钻探验证显示该区域的吻合情况达 78%。

4.6 效果分析

依靠电法勘探技术的实施,于矿区共圈定 6 个矿化异常区域,合计的面积为 3.8km^2 ,有 3 处异常区。经钻探得以验证,觅得 3 条铜矿化带,各条铜矿化带长度分别为 350m、280m、420m,平均厚度按顺序为 4.2m、3.8m、5.5m,铜的品位介于 0.5% 至 2.8% 之间,和预测的三维地电模型的匹配度达 82%。高密度电阻率法定位浅部矿化带,误差可控制在 3m 以内。CSAMT 与 TDIP 联合探测,深部矿化体识别深度提升到 300m,与传统方法相比较,深度提高至比其多 50m。经干扰抑制的处理流程结束后,矿化异常信噪比在处理后有 35% 的提升,一级靶区钻探命中几率达到 75%,极大降低勘探的成本投入,缩短了找矿所需的时间周期。

5 结语

本文对铜矿找矿中地球物理勘探技术的运用进行系统性剖析后,结合实际矿区提出了基于高精度数据反演定位矿化带、多参数电法联合提取矿化信息、干扰抑制与异常增强及三维建模预测矿化潜力等措施,能有效提升铜矿找矿的精准度和效率,对今后同类复杂地质条件下的铜矿找矿工作,具有一定参考价值。相关人员未来应不断革故鼎新,积极推动地球物理勘探技术与人工智能、大数据等新兴技术的深度融合,优化数据处理与解释模型,以契合深部资源勘探及绿色勘探的发展需求,为实现铜矿资源的可持续开发利用提供更坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 荆林海,李光明,丁海峰,等.班怒带中西段斑岩铜矿遥感选区、地质评价与重大发现[J].岩石学报,2025,41(02):362-382.
- [2] 邹明宋,秦克能,张颖豪.云南省景谷县曾家村铜矿东矿段北段深部成矿潜力多维剖析[J].有色矿冶,2025,41(01):1-5+11.
- [3] 李世森,谢登科,钟小琴,等.哈密大红山铜矿床地质特征与找矿标志研究[J].新疆有色金属,2025,48(01):26-28.
- [4] 我国铜矿找矿取得重大突破[J].中国有色冶金,2025,54(01):104.
- [5] 冯志红,毛国宾,刘明江,等.铜矿矿床地质特征及找矿潜力研究——以大红山铜矿为例[J].世界有色金属,2025,(01):67-69.